

学校编码: 10384

密级_____

学号: 22420060153349

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

南海北部天然气水合物潜在区气源发育
条件与沉积地球化学特征研究

Research of Accumulation Conditions of Gas Source and
Sedimentary Geochemical Characteristics of Gas Hydrate
Potential Areas in the Northern South China Sea

官宝聪

指导教师姓名: 雷 怀 彦 教授

专 业 名 称: 海 洋 地 质

论文提交日期: 2010 年 06 月

论文答辩日期: 2010 年 03 月

2010 年 06 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

南海是天然气水合物研究的新兴热点海域,本论文在国家 973 项目《我国天然气水合物富集规律与开采基础研究》子课题“南海北部天然气水合物成藏的气源条件研究”和国家自然科学基金项目《南海北部海底沉积层硫酸盐-甲烷体系产消机制及其界面(SMI)特征研究》的支持下,围绕天然气水合物气源发育条件这一主题开展研究。论文中选取南海北部琼东南盆地、珠江口盆地和台西南盆地为研究区域,采取宏观研究与微观分析相结合的研究思路,从宏观上,系统阐述了南海地质构造演化为天然气水合物形成奠定了有利的地质构造环境,从微观上,详细阐明了南海北部研究区内天然气水合物形成的物质来源、温压条件和储集空间。采用海上调查采样与室内实验分析相结合的研究方法,综合运用元素分析仪与同位素比值质谱仪联机(EA-IRMS)、TM-1000 扫描电子显微镜带能谱分析、Rock-Eval II 型热解分析仪和碳硫分析仪等多种仪器分析与测试技术,对南海北部 ODP184 航次站位、973 项目航次站位、神狐海域天然气水合物钻探站位等多口沉积物柱状样品进行元素地球化学、同位素地球化学和有机地球化学方面的测定与分析,主要开展了沉积物常量元素含量,碳、氧、氮稳定同位素和有机质含量、类型及其成熟度等指标的测定计算,同时结合前人在南海北部获得的地质、地球物理和地球化学等研究资料,以琼东南盆地、珠江口盆地和台西南盆地的构造演化过程为线索,阐明了天然气水合物潜在区气源发育的有利构造-沉积-层序地层条件,确定了不同潜在区为天然气水合物形成提供气源供给的烃源岩层,同时,对比研究已钻获与未钻获天然气水合物潜在区的沉积地球化学特征,指出了潜在区沉积物地球化学特征与烃类气源发育具有相关性,探讨了神狐海域天然气水合物气源的成因类型及其成藏的地质模式,以期对南海天然气水合物的进一步勘探开发研究提供一些有益参考。具体获得了以下几点成果:

第一,综合分析了研究区域天然气水合物潜在区的成藏地质模式以及气源发育的构造-沉积-层序特征,得出了琼东南盆地的陵水组和崖城组、珠江口盆地的

文昌组和恩平组以及台西南盆地渐新世的含气层是天然气水合物气源发育的有利烃源岩层的结论。

第二，通过岩芯沉积物元素地球化学特征分析，发现了沉积物中 Fe、S、Cl 等元素含量变化与天然气水合物气源发育具有相关性。

第三，对比分析神狐海域与 ODP184 航次岩芯沉积物的有机地球化学特征，发现沉积物有机质的母质均以陆生植物为主，同时综合考虑神狐海域沉积物有机质碳含量、有机质类型以及地质构造发育条件，认为神狐海域天然气水合物气源主要是深部的烃源岩的热解气，成藏类型属于混合成因型。

关键词：天然气水合物；气源发育条件；沉积地球化学；南海

Abstract

The South China Sea is a new hot research area in gas hydrate. This paper is based on the sub-project “Research of gas source conditions of gas hydrate reservoir in the northern South China Sea” in the National 973 items “Basic research of accumulation and exploitation of gas hydrate in China”, and National Natural Science Foundation “Study for production and consumption mechanism of sulfate-methane system and characteristic of sulfate-methane interface (SMI) in marine sediments in the northern South China Sea”. It focuses on a theme to research the gas source conditions of gas hydrate. We selected the potential basins (Qiongdongnan Basin, Zhujiangkou Basin and Taixinan Basin) as the research areas in the northern South China Sea. Adopting the research ideas of macro-micro combination, in macro we described that the tectonic evolution of South China Sea provided a favorable geological environment, and explained clearly the required material sources, temperature and pressure conditions and reservoir geological conditions in research areas of the northern South China Sea. Carrying out the research methods of maritime survey sampling cooperate with experimental analysis, we synthetically used elemental analyzer and isotope ratio mass spectrometer (EA-IRMS), scanning electron microscope with energy spectrum analysis (TM-1000), Rock-Eval II pyrolysis analyzer, carbon-sulfur analyzer and other instrumental analysis methods or testing techniques. By these ways, we completed observation and analysis of the sediment samples collected from sites of ODP Leg 184, 973 items Leg and Shenhu sea area about the element geochemistry, isotope geochemistry and organic geochemistry. We mainly carried out analyzing the content of major elements, isotopes of carbon, oxygen and nitrogen, and the content, type, maturity of organic. Combining the data of passed research in geology, geophysics and geochemistry, according to the tectonic evolutionary processes of Qiongdongnan Basin,

Zhujiangkou Basin and Taixinan Basin, we clarified the favorable conditions of geological structure, sediment environment and sequence stratigraphy in potential areas of gas hydrate, and identified the hydrocarbon rock sequences of gas source accumulation in different potential areas of gas hydrate. Comparing the characters of sedimentary geochemistry between the areas have been found gas hydrate and haven't, we pointed out the correlations between geochemistry characters of sediment samples and the deep hydrocarbon rocks in potential areas of gas hydrate. Finally, we studied the type of gas source and reservoir geological model of gas hydrate in Shenhu area. These researches are important to provide some scientific evidence to support the further exploration and development research of gas hydrate in South China Sea. Specific results obtained following:

Firstly, this paper comprehensively analyzed reservoir geological models and structure-deposits-sequence characteristics of gas source development of gas hydrate in the potential areas of the northern South China Sea. We considered that there were favorable source rocks of gas source development of gas hydrate in the potential areas, including the Lingshui and Yacheng formation of Qiongdongnan basin, the Wenchang and Enping formation of Zhujiangkou basin, and the gas-bearing layer in Oligocene of Taixinan basin.

Secondly, according to the elemental geochemistry analysis of sediment samples, we found the correlations between contents change of Fe, S, Cl elements and gas source development of gas hydrate.

Thirdly, according to the comparative analysis of the organic geochemical characters of core sediments from sites of Shenhu areas and ODP Leg 184, we found the parent material of sediment organic matter mainly was terrestrial plant. Considering the contents and types of organic matter in sediments and the development conditions of geological structure, we concluded that the deep pyrolysis of hydrocarbon source rocks was the mainly gas source of gas hydrate in Shenhu sea area. So it must be the mixed gas type of gas hydrate reservoir.

Keywords: gas hydrate; development conditions of hydrocarbon gases; sedimentary geochemistry; South China Sea

目 录

摘 要	I
Abstract.....	I
目 录	1
Table of Contents	1
第一章 绪 论	1
1.1 选题研究意义	1
1.2 选题研究现状与存在问题	4
1.3 选题研究依据	8
1.4 选题研究目的	8
1.5 研究技术路线	9
第二章 样品来源与研究方法	11
2.1 样品来源	11
2.1.1 973 项目航次样品.....	11
2.1.2 ODP184 航次样品.....	12
2.1.3 神狐海域天然气水合物钻探航次样品.....	13
2.2 研究方法	14
2.2.1 有机碳、氮含量及同位素测定.....	14
2.2.2 碳酸岩碳、氧同位素测定.....	15
2.2.3 Rock-Eval 热解分析	16
2.2.4 碳硫同位素分析.....	17
2.2.5 扫描电镜观察与元素能谱分析.....	18
第三章 南海天然气水合物成藏的地质环境特征	20

3.1 南海基本地质概况	20
3.1.1 地理位置	20
3.1.2 地形地貌	21
3.1.3 构造地质演化	22
3.2 南海天然气水合物成藏的地质环境条件	25
3.2.1 物源条件	25
3.2.2 温压条件	29
3.2.3 储层条件	31
3.3 南海天然气水合物的成藏模式	34
3.3.1 增生楔型与海脊型	34
3.3.2 盆缘斜坡型	36
3.3.3 埋藏背斜型	37
3.3.4 断皱型	37
3.3.5 滑塌型	39
3.3.6 底辟或泥火山型	40
小 结	43
第四章 南海北部天然气水合物潜在区的气源发育条件	45
4.1 南海北部天然气水合物潜在区的构造-沉积-层序特征	46
4.1.1 天然气水合物潜在区的地质构造演化	46
4.1.2 天然气水合物潜在区的沉积环境与层序地层特征	49
4.2 南海北部天然气水合物潜在区烃源岩发育特征	57
4.2.1 琼东南盆地潜在区烃源岩发育特征	58
4.2.2 珠江口盆地潜在区烃源岩发育特征	62
4.2.3 台西南盆地潜在区烃源岩发育特征	66
小 结	68
第五章 南海北部天然气水合物潜在区的沉积地球化学特征	70

5.1 南海北部研究区沉积物元素地球化学特征	71
5.1.1 ODP184 航次沉积物元素地球化学特征.....	72
5.1.2 973 项目航次沉积物元素地球化学特征.....	79
5.1.3 神狐海域沉积物元素地球化学特征.....	86
5.2 南海北部研究区沉积物同位素地球化学特征	94
5.2.1 ODP184 航次站位沉积物同位素地球化学特征	94
5.2.2 973 项目航次站位沉积物同位素地球化学特征	98
5.2.3 神狐海域站位沉积物同位素地球化学特征.....	103
5.3 南海北部研究区沉积物有机地球化学特征	108
5.3.1 973 航次站位岩芯沉积物有机地球化学特征.....	109
5.3.2 神狐海域站位岩芯沉积物有机地球化学特征.....	114
小 结	120
第六章 结 论	122
参考文献	125
致 谢	132
附 录	133

Table of Contents

Abstract in Chinese.....	I
Abstract in English	IV
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Significance.....	1
1.2 Investigation and Research Progress	4
1.3 Basis of Research	8
1.4 Research Purpose	8
1.5 Technique Route.....	9
Chapter 2 Research Materials and Analysis Methods.....	11
2.1 Rresearch Materials.....	11
2.1.1 Samples from 973 Project Voyage Station	11
2.1.2 Samples from ODP Leg 184.....	12
2.1.3 Samples from Shenhu Drilling Voyage for Gas Hydrate	13
2.2 Analysis Methods.....	14
2.2.1 Determination of Organic Carbon, Nitrogen and Isotope.....	14
2.2.2 Determination of Carbon, Oxygen Isotopes in Carbonate.....	15
2.2.3 Rock-Eval Pyrolysis Analysis.....	16
2.2.4 Analysis of Carbon, Sulfate Isotopes.....	17
2.2.5 SEM and EDS Analysis.....	18
Chapter 3 Characters of Geological Environment for Gas Hydrate	
Reservoir in South China Sea.....	20

3.1 Basic Geology of South China Sea	20
3.1.1 Location	20
3.1.2 Topography	21
3.1.3 Evolution of Structural Geology	22
3.2 Geological Conditions of Gas Hydrate Reservoir in South China Sea	25
3.2.1 Material Condition	25
3.2.2 Temperature and Pressure Condition	29
3.2.3 Accumulation Layer Condition	31
3.3 Model of Gas Hydrate Reservoir in South China Sea	34
3.3.1 Accretionary-Wedge Type and Ridge Type	34
3.3.2 Slope on the Edge of Basin Type	37
3.3.3 Buried Anticline Type	37
3.3.4 Breaking Folds Type	38
3.3.5 Slump Type	39
3.3.6 Diapirism or Mud-Volcano Type	40
Summary	43
Chapter 4 Development Conditions of Hydrocarbon Gases in	
Potential Areas of Gas Hydrate in the North of South China Sea	45
4.1 The Sctonic-deposit-sequence Characters in Potential Areas of Gas	
Hydrate in the North South China Sea	46
4.1.1 Evolution of Structural Geology in the Methane Hydrate Potential	
Areas	46
4.1.2 Sedimentary Environment and Sequence Layers Character in the Gas	
Hydrate Potential Areas	49
4.2 Characters of Hydrocarbon Source Rock in Potential Areas of Gas	
Hydrate in the North South China Sea	57
4.2.1 Characters of Hydrocarbon Source Rock in Qiongdongnan Basin	58

4.2.2 Characters of Hydrocarbon Source Rock in Zhujiangkou Basin.....	62
4.2.3 Characters of Hydrocarbon Source Rock in Taixinan Basin	66
Summary.....	68
Chapter 5 Character of Sedimentary Geochemistry in Potential	
Areas of Gas Hydrate in the North South China Sea	70
5.1 Element Geochemistry Characters in the North South China Sea.....	71
5.1.1 Element Geochemistry Characters of ODP184 Samples.....	72
5.1.2 Element Geochemistry Characters of 973 Samples.....	79
5.1.3 Element Geochemistry Characters of Shenhu Samples.....	86
5.2 Isotope Geochemistry Characters in the North South China Sea	94
5.2.1 Isotope Geochemistry Characters of ODP184 Samples	94
5.2.2 Isotope Geochemistry Characters of 973 Samples	98
5.2.3 Isotope Geochemistry Characters of Shenhu Samples	103
5.3 Organic geochemistry characters in the North South China Sea	108
5.3.1 Organic Geochemistry Characters of 973 Samples	109
5.3.2 Organic Geochemistry Characters of Shenhu Samples	114
Summary	120
Chapter 6 Conclutions and Outlook	122
Reference	125
Acknowledgement.....	132
Appendix	133

第一章 绪 论

1.1 选题研究意义

随着我国经济的快速发展,对能源资源尤其是油气资源的需求正在急剧增加,油气产量已远远不能满足经济发展的需求,能源短缺和供给安全问题已经成为制约我国经济可持续发展的重要因素,严重影响我国国民经济的健康平稳发展,甚至威胁国家安全。因此,解决能源短缺、寻找新的替代能源不仅是当务之急,而且是一项长期的国家能源战略任务。天然气水合物由于其具有能量密度高、分布广、规模大、埋藏浅、成藏物化条件优越,且产出的天然气能满足能源、经济、环境和效率需要等特点,是未来理想的战略替代能源。

据统计,截止 2002 年底,世界上已直接或间接发现天然气水合物的矿点共有 116 处,其中海洋(包括少数深水湖泊)107 处,永久冻土带 9 处(如图 1.1)。全球海底天然气水合物可划分成 3 个成矿带,即西太平洋成矿带、东太平洋成矿带和大西洋成矿带。西太平洋成矿带,从最北端的阿拉斯加大陆坡开始,经阿留申海槽、白令海、千岛海沟、鄂霍茨克海、日本海、南海海槽、苏拉威西海、帝汶海槽,到澳大利亚的豪海岭,直至新西兰近海已发现天然气水合物或良好的似海底反射层(BSR)。东太平洋成矿带包括中美海槽、北加利福尼亚—俄勒冈滨外、秘鲁海槽等。在大西洋成矿带,目前已在布莱克海台、墨西哥湾路易斯安那陆坡、加勒比海南部陆坡、南美东海岸滨外亚马逊海底扇和非洲西海岸尼日利亚滨外三角洲等地发现有天然气水合物。随着对天然气水合物的勘探调查研究工作的深入开展,天然气水合物潜在的战略意义和经济效益引起许多国家政府的高度重视,如美国、日本、印度、加拿大、韩国等国家都纷纷制订天然气水合物研究开发战略和国家研究开发项目计划。美国于 1981 年投入 800 万美元制订了天然气水合物 10 年研究计划,1998 年又把天然气水合物作为国家发展的战略能源列入长远计划,每年投入 2000 万美元,准备在 2015 年试开采。日本经济产业省已从 2000 年开始着手开发海底天然气水合物,开发计划分两段进行,前 5 年对开采海域的蕴藏量和分布情况进行调查,后 5 年进行试验性采掘工作,2015 年以后实现商业生产。韩国已成功完成《可燃冰开发 10 年计划》第一阶段任务,确

认韩国周边海域海底可燃冰矿藏，并对储藏量进行初步估计。印度在 1995 年制订了 5 年期《全国气体水合物研究计划》，由国家投资 5600 万美元对其周边海域的天然气水合物进行前期调查研究。2002 年 1 月，日本与加拿大合作在加拿大北部冻土带麦肯齐三角洲 Mallik2L-38 井试验开采天然气水合物获得成功。2007 年，美国能源部（DOE）与英国石油公司（BP）合作，在阿拉斯加北坡生产试验钻井中采出 130m 含有天然气水合物的岩心。这些陆域冻土带天然气水合物的生产试验成功为海洋天然气水合物的勘探开发利用带来了曙光。

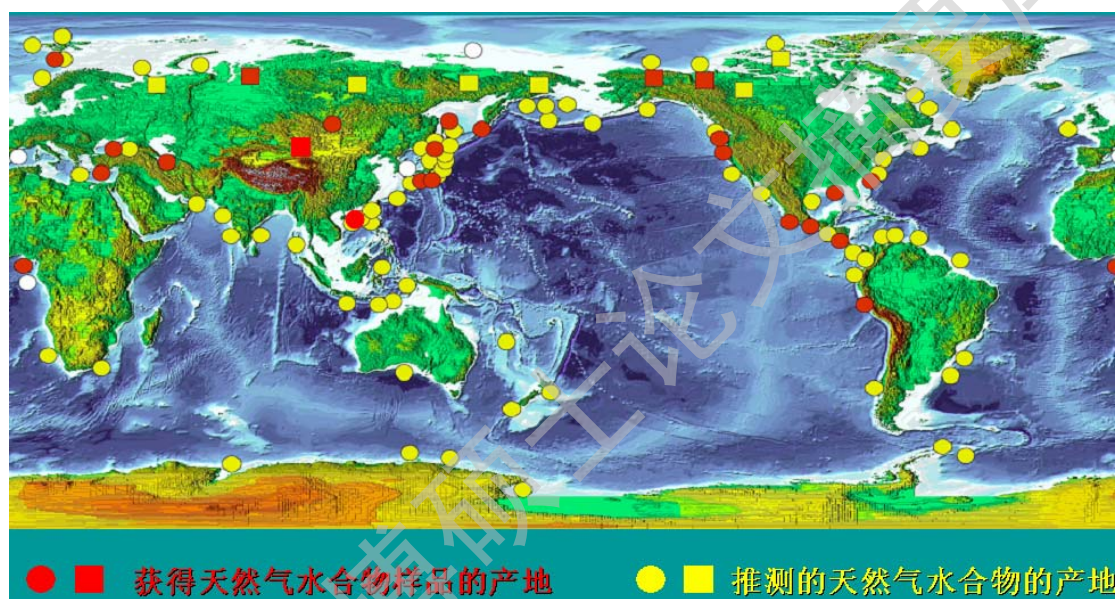


图 1.1 全球天然气水合物矿点分布图

Fig.1.1 The global distribution of gas hydrate occurrence

近年来，我国政府和科学界也日益重视天然气水合物的勘探开发和相关的科学研究。在《国家中长期科技发展规划纲要（2006-2020）》中明确将“推进能源结构多元化，增加能源供应”作为当前的重点领域和优先主题之一，其中天然气水合物勘探开发被列为前沿研究领域之一，并制定了天然气水合物的开发战略规划安排：2006-2020 年是勘探调查阶段，2020-2030 年是开发试生产阶段，2030-2050 年，将进入商业生产阶段。我国东部、南部海域和西部冻土带都是天然气水合物发育的理想场所，近年调查研究已发现了许多天然气水合物赋存的地质、地球物理、地球化学和生物证据，推测出海域和冻土带天然气水合物有利勘探区域（如图 1.2，图 1.3，周幼吾，郭东信等.2000；张洪涛，张海启等，2007），并对主要区域天然气水合物资源量进行了初步评价（见表 1.1，张树林，2008）。

我国于 2007 年 5 月在南海神狐海域钻获天然气水合物之后，2009 年 9 月 25 日又在祁连山木里冻土区钻获天然气水合物，成为世界上第一个在中低纬度冻土区发现“可燃冰”的国家，充分表明我国天然气水合物资源开发利用的广阔前景，因此，深入研究天然气水合物成藏机理、富集规律和钻探开采的相关技术，为我国海洋以及冻土带天然气水合物的资源勘探和开发提供科学依据和指导，对保障我国能源安全和促进经济的可持续发展，都具有重要的政治、经济和科学意义。

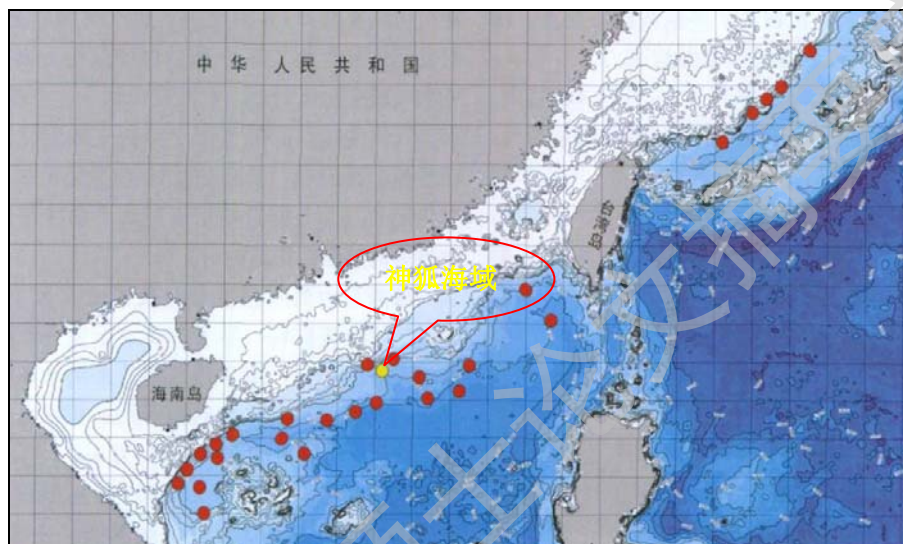


图 1.2 中国海域推测存在天然气水合物分布图

Fig.1.2 Distribution for speculate the existence of gas hydrate in China's Sea areas

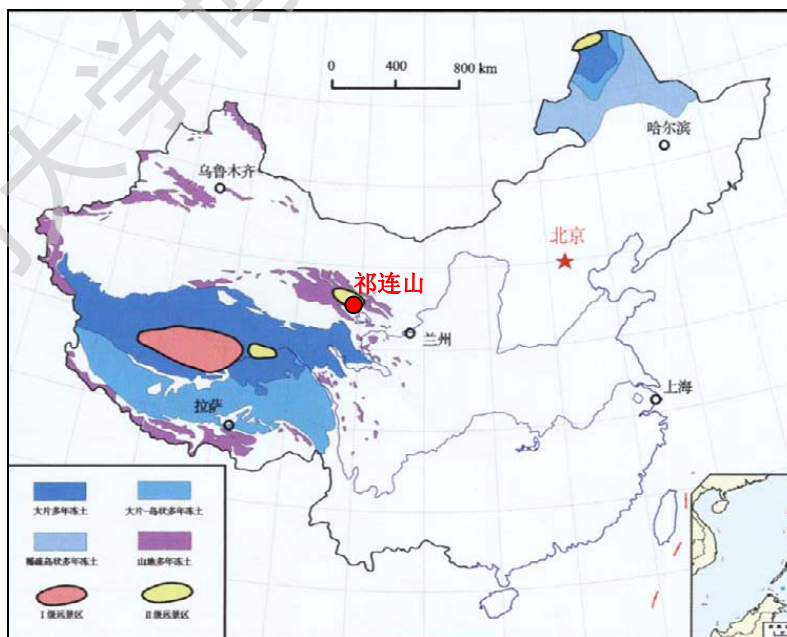


图 1.3 中国冻土带天然气水合物勘探区域及钻探位置图

Fig.1.3 Map showing exploration areas of gas hydrate and drilling location in permafrost zones of China

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库